МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



629.7.017.1 DOI 10.12737/19693

Оценка надежности машин на основе рисков их функционирования*

И. А. Хозяев[1], Л. В. Коледов[2], В. А. Важенин[3] **

[1,2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[3] Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Reliability evaluation of machines based on their operation risks***

I. A. Khozyaev, L. V. Koledov, V. A. Vazhenin**

[1,2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[3] Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью работы являлось создание метода оценки и прогнозирования надежности сложных систем на основе статистического имитационного моделирования их работы. Использован метод рисков с учетом потерянной выгоды. Предложены зависимости для определения потерь от отказов при функционировании системы в зависимости от степени ее безотказности. Разработана программа для проведения имитационного моделирования с учетом рисков от надежности — "Reliabilify". Проверка разработанного метода проводилась на основе имитационного моделирования работы измельчителя компонентов комбикормов типа У17-УКИ. Полученные результаты отражают реальные процессы, происходящие при эксплуатации технических объектов. Метод полностью формализован и может быть использован для оценки надежности любых технических систем.

Ключевые слова: надежность, риск, статистическое имитационное моделирование.

The work objective is to develop a technique of evaluation and forecasting of the complex systems reliability based on the statistic simulation of their operation. A method of risks inherent in the lost benefit is used. Dependences for determining failure losses under the system operation according to the degree of its reliability are offered. A simulation program taking into account risks of reliability – “Reliabilify” – is worked out. The developed method verification is based on the performance simulation of the feed ingredient cutter, such as U17-UKI. The results obtained reflect real processes occurring in the course of the technical objects operation. The method is fully formalized and can be used for estimating the reliability of any engineering system.

Keywords: reliability, risk, statistic simulation modeling.

Введение. Отказ технической системы неизбежно ведет к потерям: производство останавливается или сокращается, отказавшая система требует ремонта, а последствия аварий — ликвидации. Кроме того, эксплуатация ненадежной техники может оказывать негативное влияние на окружающую среду и людей.

Экономическая оценка от ненадежности оборудования в настоящее время проводится в два этапа. Сначала рассчитываются показатели надежности системы или машины, а затем определяются убытки. Такая процедура довольно длительная и трудоемкая. Если использовать такое понятие как риск, то экономическую оценку ненадежности можно проводить быстрее и точнее. Риск является неизбежным атрибутом эксплуатации техники. Он является одним из важнейших показателей безопасности. Риск, возникающий в результате отказов техники, называется техногенным.

Риск можно рассматривать как вероятность некоторых неблагоприятных событий, но обычно под риском понимают оценку ожидаемого вреда (потерь) от неблагоприятных событий. В большинстве случаев риск оценивается денежными единицами, хотя могут быть и иные случаи.

Степень риска может быть оценена следующим образом [1–3]

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

** E-mail: dmitriyrudoi@gmail.com, leonidvkoledov@mail.ru, vladislav251990@gmail.com

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

$$R = Q(t)\cdot C = \left[1 - P(t)\right]\cdot C$$

$$R(t) = \sum_{j-1}^{n} c_j \cdot p_j(t) \qquad (1)$$

где R — величина риска, $P(t)$ — вероятность безотказной работы системы, $Q(t)$ — вероятность появления отказа, C — величина потерь, возникающих в результате отказа, c_j — потери от отказа j-ого элемента, $p_j(t)$ — вероятность безотказной работы j-ого элемента.

Постановка задачи. Вопрос заключается в определении $Q(t)$ или $P(t)$. Чаще всего определяется $P(t)$. Для этого строится структурная иерархическая схема системы (машины), состоящая из конечного количества элементов и на основе $P_э(t)$ (вероятность безотказной работы одного элемента) определяется $P(t)$.

Основные формулы для различных соединений. Элементы в системе могут быть соединены последовательно, параллельно или смешано. Но, в конечном итоге, это будет сложное последовательное соединение. При таком соединении вероятность безотказной работы системы равна произведению вероятностей безотказной работы всех элементов [4, 5].

$$p_c(t) = \prod_{j-1}^{n} p_j(t) \qquad (2)$$

где $p_i(t)$— вероятность безотказной работы.

При параллельном соединении m элементов вероятность безотказной работы:

$$p_c(t) = 1 - \prod_{j-1}^{n} 1 - p_j(t) \qquad (3)$$

Поэтому параллельное соединение используется для эффективного резервирования системы. Для смешанного соединения (n последовательных групп из m параллельных элементов) вероятность безотказной работы:

$$p_c(t) = \prod_{j-1}^{n}\left\{1 - \prod_{j-1}^{n} 1 - p_j(t)\right\} \qquad (4)$$

Каждый элемент характеризуется тремя показателями: наработкой на отказ T_p, временем восстановления $T_в$ и ценой. T_p и $T_в$ случайные величины, которые характеризуются соответствующими распределениями.

Программная реализация процесса. Решение задачи в такой постановке лучше всего проводить методом статистического моделирования [4,5].

Для оценки надежности системы и учета рисков была разработана программа для имитационного моделирования ее работы. Блок-схема программы приведена на рисунке 1 [6].

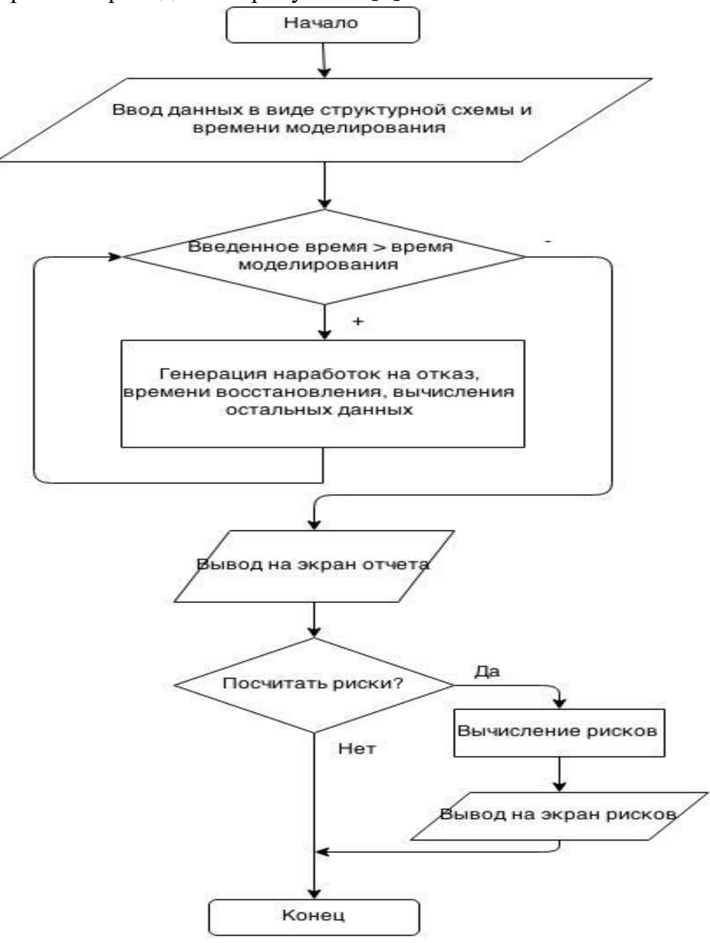


Рис. 1. Блок-схема программного комплекса Reliability

Достоинством представленного программного комплекса является его полная формализация, позволяющая имитировать надежность функционирования любых технологических систем при имеющейся структурной схеме и параметрах элементов, входящих в эту схему.

Проверка предполагаемого подхода по оценке риска, связанного с надежностью исследуемого объекта, проводили на основе имитационного моделирования надежности функционирования универсального измельчителя компонентов комбикормов типа У17-УКИ.

Общий вид измельчителя показан на рис. 2, а его структурная схема имитационного моделирования надежности представлена на рис. 3.



Рис. 2 Общий вид измельчителя У17-УКИ

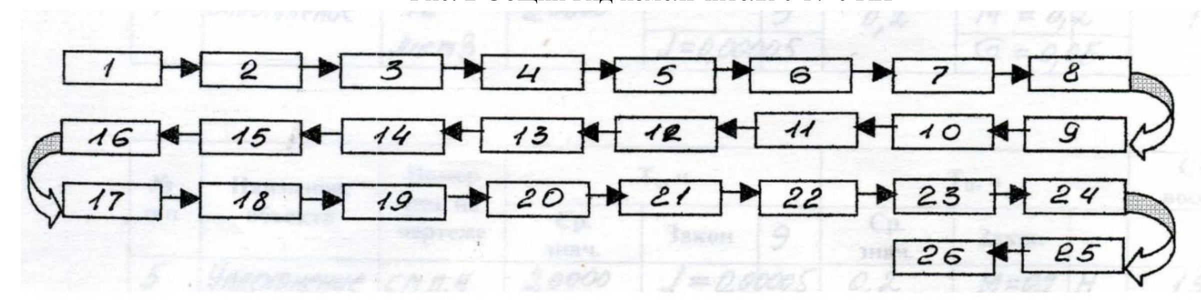


Рис. 3 Структурная схема измельчителя У17-УКИ : 1 — бункер для зерна с заслонкой; 2,3 — подшипник в сборе; 4,5 — уплотнение подшипника; 6 — шкив измельчающего барабана в сборе (со шпонкой и стопорным винтом); 7 — вал ротора; 8 — барабан ротора со шпонкой; 9–12 — пальцы молотков; 13 — набор молотков (24 шт.); 14 — роторная втулка барабана с винтом; 15 — нож; 16 — терка; 17 — ремень приводной; 18 — электродвигатель трехфазный; 19, 20 — конденсатор электролитический; 21 — кнопочная станция; 22 — пускатель; 23 — кабель питания; 24 — шкив электродвигателя в сборе; 25 — загрузочное устройство для овощей и зелени; 26 — корпус в сборе

В таблице 1 представлены фрагменты параметров законов распределения наработок на отказ T_O времени восстановления T_B и первоначальной стоимости элементов [7].

Таблица 1

Пример задания исходных данных для имитационного моделирования

п/п	Наименование объекта	T_O, ч		$T_в$, ч		Стоимость, руб
		Ср. знач.	Закон	Ср. знач.	Закон	
5	Нож	600	Н M=600 σ =150	0,12	Н M=0.12 σ=0.03	1000
6	Терка	600	Н M=600 σ =150	0,12	Н M=0.12 σ=0.03	1000

Имитационное моделирование проводилось на отрезке времени 10 000 часов при десятикратном повторении.

Вероятность появления отказов вычислялась на основе данных, полученных в результате имитационного моделирования работы рассматриваемой системы по формуле статистической вероятности появления отказов [8–10]:

$$R_i(t) = \frac{m_i(t)}{n(t)} \tag{5}$$

где $m_i(t)$ — число отказов i-ого элемента к моменту времени t, $n(t)$ — общее число отказов всех элементов за промежуток t. Результаты моделирования представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Результаты оценки рисков от ненадежности измельчителя У17-УКИ.
Данные ранжированы по степени риска

№ п/п	Название	Цена детали, руб	Риск, руб
13	Комплект молотков	960	227,37
15	Нож	1000	223,68
16	Терка	1000	223,68
18	Электродвигатель	5000	131,58
24	Шкив ЭД	800	31,58
17	Ремень	350	18,42
7	Вал ротора	1200	15,79
1	Загрузочное устройство	600	15,79
22	Пускатель	480	12,63
19	Конденсатор 1	480	6,31
20	Конденсатор 2	480	6,31
21	Кнопочная станция	400	5,26
10	Палец молотка 3	200	5,26
23	Кабель электрический	300	3,95
12	Палец молотка 2	200	2,63
4	Уплотнение 2	60	0,79
14	Втулка распорная барабана	24	0,63

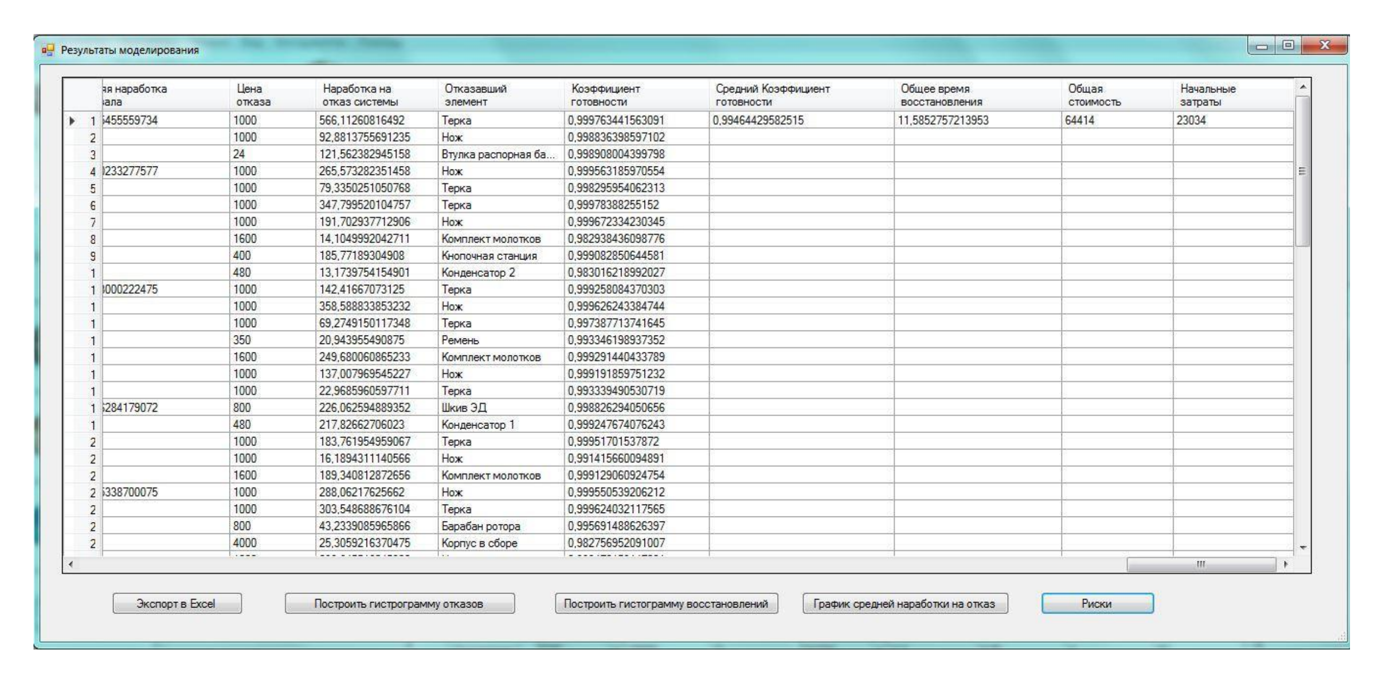
Остальные элементы из схемы на рис. 3 в таблицу не вошли ввиду малого влияния на надежность измельчителя.

При моделировании также рассчитывались показатели: коэффициент готовности ($К_г$), общее время восстановления всех отказов ($Т_в$), суммарная стоимость рисков и количество отказов. Усредненные показатели надежности функционирования измельчителя У17-УКИ приведены в таблице 3, а скриншот окна программы показан на рис. 4.

Таблица 3

Сводные результаты статистического моделирования надежности
функционирования измельчителя У17-УКИ на отрезке времени 10 000

Средний коэффициент готовности	Общее время восстановления, час	Общая стоимость рисков, руб	Начальные затраты (цена машины)	Количество отказов
0,99	13,94	69 808	22 394	69



	ая наработка ала	Цена отказа	Наработка на отказ системы	Отказавший элемент	Коэффициент готовности	Средний Коэффициент готовности	Общее время восстановления	Общая стоимость	Начальные затраты
1	455559734	1000	566,11260816492	Терка	0,999763441563091	0,99464429582515	11,5852757213953	64414	23034
2		1000	92,8813755691235	Нож	0,998836398597102				
3		24	121,562382945158	Втулка распорная ба...	0,998908004399798				
4	233277577	1000	265,573282351458	Нож	0,999563185970554				
5		1000	79,3350251050768	Терка	0,998295954062313				
6		1000	347,799520104757	Терка	0,99978388255152				
7		1000	191,702937712906	Нож	0,999672334230345				
8		1600	14,1049992042711	Комплект молотков	0,982938436098776				
9		400	185,77189304908	Кнопочная станция	0,999082850644581				
1		480	13,1739754154901	Конденсатор 2	0,983016218992027				
1	000222475	1000	142,41667073125	Терка	0,999258084370303				
1		1000	358,588833853232	Нож	0,999626243384744				
1		1000	69,2749150117348	Терка	0,997387713741645				
1		350	20,943955490875	Ремень	0,993346198937352				
1		1600	249,680060865233	Комплект молотков	0,999291440433789				
1		1000	137,007969545227	Нож	0,999191859751232				
1		1000	22,9685960597711	Терка	0,993339490530719				
1	284179072	800	226,062594889352	Шкив ЭД	0,998826294050656				
1		480	217,82662706023	Конденсатор 1	0,999247674076243				
2		1000	183,761954959067	Терка	0,99951701537872				
2		1000	16,1894311140566	Нож	0,991415660094891				
2		1600	189,340812872656	Комплект молотков	0,999129060924754				
2	338700075	1000	288,06217625662	Нож	0,999550539206212				
2		1000	303,548688676104	Терка	0,999624032117565				
2		800	43,2339085965866	Барабан ротора	0,995691488626397				
2		4000	25,3059216370475	Корпус в сборе	0,982756952091007				

Рис. 4. Скриншот работы программы

Проанализируем полученные результаты. Учитывая, что срок гарантийной работы измельчителя составляет 10 000 часов, то при работе в течение 7 часов в смену 305 дней в году срок службы машины составит 4,68 года. Исходя из этих рассуждений и, судя по показателям в табл. 3, машина довольно надежная. Общая стоимость рисков 69 808 руб. при стоимости машины 22 394 руб., что вполне согласуется с общепринятыми положениями, что эксплуатационные затраты обычно в 3–4 раза больше первоначальных.

Риски рассчитывались, исходя из предположения, что они определяются только стоимостью заменяемой детали. На самом деле в риски должны включаться стоимость поиска детали и оплата труда рабочего. В среднем это составляет 30% от стоимости детали. Стало быть, общая сумма рисков будет 90 750 руб. Посчитаем также упущенную выгоду по зерну. Производительность измельчителя по зерну составляет 200 кг/час. За 13,94 часа (общее время восстановления) должно быть измельчено 0,2×13,94=2,78 т. Стоимость одной тонны зерна в настоящее время составляет порядка 7 тысяч рублей. Тогда суммарная упущенная выгода составит 110 210 руб.

Как показывает опыт эксплуатации таких измельчителей, одним из слабых их мест являются молотки. Из каталога был выбран комплект молотков с наиболее высокой наработкой на отказ. Стоимость его составляла 1 600 руб. (против 960 руб. у прототипа). Далее была проведена оценка рисков по той же программе и методике. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4

Сводные результаты моделирования надежности функционирования измельчителя У17-УКИ с молотками повышенной надежности

Средний коэффициент готовности	Общее время восстановления, час	Общая стоимость рисков, руб.	Начальные затраты (цена машины)	Количество отказов
0,995	11,58	64 414	23 034	54

Тогда общая стоимость рисков улучшенной машины с учетом упущенной выгоды 83 746,2 руб., что на 26 463 руб. меньше, чем было. Таким образом, видим, что увеличение первоначальной стоимости машины на 640 руб. дает повышение эффектности на 26 463 руб., т.е. примерно в 30 раз больше, чем вложено.

Выводы:

1) Разработана система оценки рисков от ненадежности машин в виде упущенной выгоды.

2) Метод основывается на принципах статистического моделирования, является полностью формализованным и может применяться для любых систем и машин.

3) Проверка метода на основе имитационного моделирования надежности функционирования измельчителя компонентов комбикормов типа У17-УКИ показала хорошую сходимость реальных результатов с данными моделирования.

Библиографический список

1. Хенли, Э. Дж. Надежность технических систем и оценка риска / Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото. — Москва : Машиностроение, 1984. — 352 с.

2. Вишняков, Я. Д. Общая теория рисков / Я. Д. Вишняков, Н. Н. Радаев. — Москва : Издательский дом «Академия», 2008. — 368 с.

3. Назаров, Н. Г. Методы экспериментальной оценки качества партии изделий с учетом степени риска : учебное пособие / Н. Г. Назаров. — Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. — 96 с.

4. Труханов, В. М. Надежность сложных систем на всех этапах жизненного цикла : монография / В. М. Труханов, А. М. Матвеенко. — Москва : Издательский дом «Спектр», 2012. — 663 с.

5. Труханов, В. М. Новый подход к обеспечению надежности сложных систем: монография / В. М. Труханов. — Москва : Издательский дом «Спектр», 2010. — 246 с.

6. Хозяев, И. А. Исследование надежности технологического оборудования методами статистического моделирования / И. А. Хозяев // Международная научно-практическая конференция в рамках промышленного прогресса Юга России «Инновационные технологии в Машиностроении». — 2009. — С.115–121.

7. Строгалев, В. П. Имитационное моделирование(2-е издание) : учебное пособие / В. П. Строгалев, И. О. Толкачева. — Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. — 296 с.

8. Wang, Y. Reliability analysis of safety-instrumented systems operated in high-demand mode / Y. Wang, M. Rausand // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 2014. — Vol. 32, № 11. — P.254–264.

9. Проников, А. С. Параметрическая надежность машин / А. С. Проников. — Москва : МГТУ им. Н. Э Баумана, 2002. — 560 с.

10. Rausand, M. Reliability effects of test strategies on safety–instrumented systems in different demand modes / M. Rausand, Y. Liu // Reliability Engineering and System Safety. — 2013. — Vol. 119, № 9. — P. 235–243.

References

1. Henley, E.J., Kumamoto, H. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem i otsenka riska. [System reliability and risk analysis.] Moscow: Mashinostroenie, 1984, 352 p. (in Russian).

2. Vishnyakov, Y.D., Radaev, N.N. Obshchaya teoriya riskov. [General risk theory.] Moscow: Izdatel'skiy dom «Akademiya », 2008, 368 p. (in Russian).

3. Nazarov, N.G. Metody eksperimental'noy otsenki kachestva partii izdeliy s uchetom stepeni riska. [Methods for experimental quality assessment of a set of products with a risk score.] Moscow: Bauman MSTU, 2015, 96 p. (in Russian).

4. Trukhanov, V.M., Matveenko, A.M. Nadezhnost' slozhnykh sistem na vsekh etapakh zhiznennogo tsikla: monografiya. [Reliability of complex systems at all stages of the life cycle: monograph.] Moscow: Izdatel'skiy dom «Spektr», 201, 663 p. (in Russian).

5. Trukhanov, V.M. Novyy podkhod k obespecheniyu nadezhnosti slozhnykh sistem: monografiya. [A new approach to complex systems reliability control: monograph]. Moscow: Izdatel'skiy dom «Spektr», 2010, 246 p. (in Russian).

6. Khozyaev, I.A. Issledovanie nadezhnosti tekhnologicheskogo oborudovaniya metodami statisticheskogo modelirovaniya. [Study on technological equipment reliability by statistical modeling methods.] Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya v ramkakh promyshlennogo progressa Yuga Rossii «Innovatsionnye tekhnologii v Mashinostroenii». [Int.Sci.-Pract. Conf. within the frame of the industrial progress of the South Russia “Innovative Technologies in Mechanical Engineering”.] 2009, pp. 115–121 (in Russian).

7. Strogalev, V.P., Tolkacheva, I.O. Imitatsionnoe modelirovanie (2-e izdanie). [Simulation modeling.] 2nd ed. Moscow: Bauman MSTU, 2015, 296 p. (in Russian).

8. Wang, Y., Rausand, M. Reliability analysis of safety-instrumented systems operated in high-demand mode. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, vol. 32, no. 11, pp. 254–264.

9. Pronikov, A.S. Parametricheskaya nadezhnost' mashin. [Parametric reliability of machines.] Moscow: Bauman MSTU, 2002, 560 p. (in Russian).

10. Rausand, M., Liu, Y. Reliability effects of test strategies on safety–instrumented systems in different demand modes. Reliability Engineering and System Safety, 2013, vol. 119, no. 9, pp. 235–243.

Поступила в редакцию 15.12.2015
Сдана в редакцию 17.12.2015
Запланирована в номер 23.03.2016